

적응성을 가진 강인한 비선형 예측제어기 설계

Design of an Adaptive Robust Nonlinear Predictive Controller

박기용, 윤지섭
(Gee-Yong Park and Ji-Sup Yoon)

Abstract : In this paper, an adaptive robust nonlinear predictive controller is developed for the continuous time nonlinear systems whose control objective is composed of the system output and its desired value. The basic control law is derived from the continuous time prediction model and its feedback dynamics shows another form of input and output linearization. In order to cope with the parameter uncertainty, robust control is incorporated into the basic control law and the asymptotic convergence of tracking error to a certain bounded region is guaranteed. For stability and performance improvement within the bounded region, an adaptive control is introduced. Simulation tests for the motion control of an underwater wall-ranging robot confirm the performance improvement and the robustness of this controller.

Keywords : nonlinear predictive control, robust control, adaptive control, underwater wall-ranging robot

I. 서론

본 논문의 비선형 예측제어기(NPC)의 비선형 예측 모델은 Lu[1]에 의해서 제시된 기법을 기반으로 하고 있고 이 제어기를 기반으로 강인성을 부과한 제어기 설계는 박기용[2]의 논문에서 제시하였다. Lu의 비선형 예측 기법은 기존의 모델 예측 제어기[3]-[6]와는 달리 비선형 모델에 대해서 바로 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 모델을 기반으로 출력에 대한 제어 목적 함수를 사용하여 기본 제어 입력을 구하면 비선형 시스템이 입력 및 출력에 대하여 선형화가 되는 결과를 보인다. 이러한 결과는 일반적인 비선형 제어기의 전형적인 특성이며, 따라서 본 제어기는 예측 모델을 기반으로 하지만 비선형 제어기들 중의 하나로 포함된다고 할 수 있다. 시스템이 구조상의 불확실성을 포함하는 경우 NPC에 강인 제어를 포함하도록 하는 것은 불확실성의 한계치를 안다면 Lyapunov 함수를 기반으로 하는 설계 기법을 이용하여 구성할 수 있다[2]. 이러한 제어기는 오차 측정(error measure) 함수의 경계 값 밖에서는 안정성을 보장하지만 경계 값 안에서는 강인 제어기의 선형 근사화로 인하여 안정성을 완전히 보장하지는 않는다. 또한 불확실성의 한계치가 크거나 하여 경계 값의 폭이 넓은 경우 제어 성능이 떨어지는 수가 있다. 이러한 문제를 개선하여 경계치 안에서 안정성을 보장하고 제어 성능을 향상시키기 위하여 적응 제어기를 설계하였다. 적응 제어기의 주된 역할은 아래의 장에서 기술하겠지만, 오차 측정 함수의 경계 값 안에서 강인 제어기와 별도로 구동하는 것이 아니라 강인 제어기의 역할을 보조하여 경계 값 안에서도 안정성을 보장하고 제어 성능을 향상시켜 정상상태의 오차를 없애는 데에 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 비선형 예측제어기에 대해서 기술한다. 제3장에서는 시스템이 시변 또는 불확실성이 존재하는 경우 시스템을 안정하게 하면서 제

어 성능을 향상시키는 강인 제어기와 적응 제어기에 대해서 기술한다. 개발된 제어기의 성능을 파악하기 위하여 오염 검사용 수중 벽면주행 로봇의 1자유도 위치 제어에 본 제어기를 적용하는 모사실험이 제4장에 기술되어 있으며 제5장에서 본 논문의 결론을 기술한다.

II. 비선형 예측제어기 설계

(1)과 같은 단일 입력, 단일 출력 비선형 시스템을 고려해보자.

$$\dot{x}^{(n)} = f(x) + g(x)u, \quad y = x \quad (1)$$

여기서 x 는 상태 벡터로 다음과 같이 정의되며, $x^T = [x \dot{x} \dots x^{(n-1)}]$, 평형 점을 포함하는 연결 집합이며, 모두 측정 가능하다고 가정한다. f 와 g 는 유한한 크기의 상태 벡터에 연속적인 미선형 함수이며 g 는 항상 0이 아니다.

비선형 예측 제어 모델은 다음과 같이 정의된다[1][2].

$$y(t+h) = z(t) + w(h)(f + gu) \quad (2)$$

(2)에서 h 는 예측 구간을 나타내는 계수이고, $z(t) = p(h)^T y(t)$, $p(h)^T = [1 \ h \ h^2/2! \ \dots \ h^{n-1}/(n-1)!]$ 및 $y^T = [y \ \dot{y} \ \dots \ y^{(n-1)}]$ 이고, $w(h) = h^n/n!$ 이다. 마찬가지로 설정하고자 하는 예측 값은 다음 (3)과 같이 정의된다.

$$y_d(t+h) = z_d(t) + w(h) y_d^{(n)}(t) \quad (3)$$

(3)에서 $z_d(t) = p(h)^T y_d(t)$ 이고 $y_d^T = [y_d \ \dot{y}_d \ \dots \ y_d^{(n-1)}]$ 이다.

(2)와 (3)으로부터 예측 오차는 다음 (4)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} e(t+h) &= y_d(t+h) - y(t+h) \\ &= z_d(t) + w(h) y_d^{(n)}(t) - w(h)(f + gu) \end{aligned} \quad (4)$$

(4)에서 $ze(t)=p(h)Te(t)$ 이고, $e^T=[e^1 \dots e^{(n-1)}]$ 이고, 제어 목적 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$J(t+h)=\frac{1}{2} e(t+h)^2 \tag{5}$$

(5)의 제어 목적을 최소화하는 최적의 제어 입력은 다음의 (6)을 만족하는 조건에서 구할 수 있다.

$$\frac{\partial J(t+h)}{\partial u(t)}=0 \tag{6}$$

(4)과 (5)을 (6)에 대입하여 풀면 제어 입력은 다음 (7)과 같이 얻어질 수 있다.

$$u_{eq}(t) = (w(h)g)^{-1} [z_e(t) + w(h)y_d^{(n)}(t) - w(h)f] \tag{7}$$

(7)을 (1)에 대입하여 페루프 동역학 방정식을 구해보면 다음 (8)과 같다.

$$e^{(n)}(t) + w(h)^{-1} z_e(t) = 0 \tag{8}$$

(8)을 자세히 보면, 상대 오차(단일입력-단일출력의 시스템 경우는 시스템 차수, n)가 4차 이하에서 안정된 선형 시불변 함수의 거동을 보이고 있다. 또한 예측 구간 h 는 (8)과 같은 오차(error) 방정식의 동역학 특성에 영향을 미치고 있다.

Remark 1 : 대부분의 로봇 등의 기계적인 장치들은 상대 오차가 4차 이하이다. 따라서 (7)의 제어 입력을 그대로 적용할 수 있다. 그러나 만약 상대 오차가 4차보다 큰 경우에는, 다음과 같이 제어 입력을 변형하면 안정한 페루프 오차 함수를 얻을 수 있다.

$$u_{eq}(t) = (wg)^{-1} [z_e(t) + w(h)y_d^{(n)}(t) - w(h)f + v(t)]$$

위의 식에서 $v(t)$ 는 보조 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$v(t) = -z_e(t) + w(h)v'(t)$$

여기서 $v'(t) = \lambda^T e$ 이고, $\lambda^T = [\frac{1}{h^n} \quad \frac{n}{h^{n-1}} \quad \dots \quad \frac{n}{h}]$ 이다.

III. 강인 및 적응 제어기

만약 비선형 시스템에서 시스템 함수를 정확히 모르는 경우 즉, 시스템 모델에 불확실성이 존재하는 경우 (7)과 같은 제어 입력은 시스템 함수의 근사치(\hat{f}, \hat{g})에 의해 구하게 된다. 따라서 (7)에 의해서는 시스템 함수가 정확하지 않은 경우에는 제어 성능이 나빠지며 더 나아가 시스템이 불안정해지는 상황이 발생할 수도 있다. 따라서 시스템의 함수를 정확하게 알지 못하고 그 함수들의 최대 값만을 아는 경우에는 시스템이 변화더라도 안정성을 줄 수 있는 강인 제어기를 설계할 수 있다. 비선형 예측 제어기에 강인 제어기를 설계하는 것은 박기용[2]의 논문에서 유도한 바 있다. 따라서 여기서는 강인 제어기 설계를 간단하게 기술한다.

비선형 시스템 함수의 근사치에 의해 얻어지는 기본 제어 입력은 다음 (9)과 같다.

$$\hat{u}_{eq}(t) = (w(h)\hat{g})^{-1} [z_e(t) + w(h)y_d^{(n)}(t) - w(h)\hat{f}] \tag{9}$$

만약 상대 오차(또는, 단일 입력, 단일 출력인 경우는 시스템 차수)가 4차 이상인 경우에는 위의 (9)에 표시한 제어 입력은 Remark 1에 기술한 바와 같이 변형하면 된다. 시스템 함수들은 다음과 같은 제한 조건을 만족하며 그 제한치는 알 수 있다고 하자.

$$|f - \hat{f}| \leq F, \quad \beta^{-1} \leq \frac{\hat{g}}{g} \leq \beta, \quad \forall t$$

여기서, $\hat{g} = \sqrt{g_{\max} g_{\min}}$ 이고 $\beta = \sqrt{g_{\max} / g_{\min}}$ 이고, 함수 g 의 부호는 알 수 있다고 하자.

이러한 비선형 시스템에 적용할 제어 입력 u_T 는 다음과 같다.

$$u_T(t) = \hat{u}_{eq}(t) + u_r(t) \tag{10}$$

위의 식에서 u_r 은 강인 제어 입력을 의미한다. (10)을 불확실성을 갖는 비선형 시스템인 (1)에 대입하면 페루프 동역학 방정식은 다음과 같이 얻어진다.

$$e^{(n)}(t) + w(h)^{-1} z_e(t) = g(d(t) - u_r(t)),$$

여기서, $d(t) = u_{eq}(t) - \hat{u}_{eq}(t)$ 이다. 위의 식은 다음과 같이 벡터 형태의 오차 방정식으로 정리할 수 있다.

$$\dot{e}(t) = \Gamma e(t) + b(d(t) - u_r(t)) \tag{11}$$

위의 식에서 $e^T = [e^1 \dots e^{(n-1)}]$ 이고, $b = [0 \dots g]^T$ 인 $n \times 1$ 벡터이며, Γ 는 다음과 같은 $n \times n$ 행렬이다.

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{n!}{h^n} & -\frac{n!}{h^{n-1}} & \dots & \dots & -\frac{n}{h} \end{bmatrix}$$

여기서 다음 식과 같은 Lyapunov 함수를 정의하자.

$$V = \frac{1}{2} e^T P e, \quad P = P^T > 0 \tag{12}$$

그리고 $n \times n$ 인 행렬인 P 는 다음 조건을 만족한다.

$$\Gamma^T P + P \Gamma = -Q, \quad Q > 0$$

(12)의 Lyapunov 함수의 시간 변화율은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P b d(t) - e^T P b u_r(t) \\ &\leq -\frac{1}{2} e^T Q e + |e^T P b| |d(t)| - e^T P b u_r(t) \end{aligned} \tag{13}$$

위의 (13)에서 $|d(t)|$ 는 다음과 같이 막음을 할 수가 있다.

$$|d(t)| \leq d_{\max}, \quad \forall t$$

여기서, $d_{\max} = \frac{1}{w(h)|\hat{g}|} \{(\beta-1) |z_e + w(h)y_d^{(n)}| + \frac{1}{|\hat{g}|} (\beta-1) |\hat{f}| + \frac{1}{|\hat{g}|} \beta F\}$ 이다.

따라서 (13)에서 강인 제어기를 (14)과 같이 설정하면,

$$u_r(t) = \text{sgn}(m(t)) d_{\max} = \text{sgn}(\overline{m}(t)) \text{sgn}(g) d_{\max} \quad (14)$$

(13)은 밑의 (15)과 같이 되며,

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} e^T Q e \quad (15)$$

추종오차는 점근적으로 0에 수렴하게 된다[2]. (14)에서 sgn 함수는 1 또는 -1의 값을 가지는 불연속성의 부호 함수이고, $m(t) = e^T P b$ 이며, $\overline{m}(t) = e^T \overline{p}_n$ (\overline{p}_n : P의 n번째 열벡터)이다. $\overline{m}(t)$ 를 여기서는 오차 측정(error measure) 함수라고 하고 $|\overline{m}(t)|$ 를 오차 측정치라고 한다. (15)으로부터 점근적 오차 수렴성의 증명은 박기용[2]의 논문에 기술한 바와 같다. (14)은 제어 입력 떨림(Control Chattering)을 유발한다. 이를 방지하기 위해 강인 제어기는 다음과 같이 수정된다.

$$u_r(t) = \begin{cases} \text{sgn}(\overline{m}(t)) \text{sgn}(g) d_{\max} & ; |\overline{m}(t)| \geq \overline{m}_{\lim} \\ (\overline{m}(t) / \overline{m}_{\lim}) \text{sgn}(g) d_{\max} & ; |\overline{m}(t)| < \overline{m}_{\lim} \end{cases} \quad (16)$$

여기서 \overline{m}_{\lim} 는 오차 측정 함수의 경계 값으로 설계자에 의해서 주어진다.

위의 (16)은 경계 값까지의 점근적인 안정성을 보장하지만 경계 값 안에서는 점근적인 안정성을 보장하지 못한다. 따라서 적응 제어기의 개념 및 설계는 경계 값 안에서 강인 제어기가 감당하지 못하는 시스템의 불확실성에 의한 영향을 어떻게 처리하느냐 하는 문제에서 비롯된다. 본 논문에서는 불확실성이 일정한 값이거나 또는 불확실성의 동적 특성이 충분히(reasonably) 느리다고 가정한다.

경계 값 안에서의 제어 입력은 다음과 같다.

$$u_r(t) = \hat{u}_{eq}(t) + u_r(t) + \hat{d}_A(t) \quad (17)$$

위의 식에서 \hat{d}_A 는 강인 제어기 u_r 을 보조하는 적응 제어기로 그 값은 매 순간마다 적응해서 변한다. (17)에 있는 적응 제어기를 유도하기 위해서 경계 값 안에서의 Lyapunov 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{1}{2\gamma} \hat{d}^2 \quad (18)$$

위의 식에서 γ 는 상수 값인 정적 적응 이득 값이고, \hat{d} 는 다음 $\hat{d}(t) = d(t) - \delta(t)^{-1} \hat{d}_A(t)$ 와 같이 정의된다. 앞 식에서 $\delta(t)$ 는 $0 < \delta(t) \leq 1, \forall t$ 를 만족하는 변수로 동적 적응 이득 값이라고 한다. $\delta(t)$ 가 위의 조건을 만족한다는 것은 현재에서는 가정으로 하고 $\delta(t)$ 에 대한 자세한 식은 뒤에서 유도된다.

(18)에서의 V의 시간 변화율은, (17)식을 이용한 페루프 동역학 방정식을 구해서 적용하면, 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} e^T Q e + m(t)(\dot{d}(t) - u_r(t) - \hat{d}_A(t)) + (1/\gamma) \hat{d} \dot{\hat{d}}$$

$$= -\frac{1}{2} e^T Q e + (1 - \delta(t))m\dot{d} - m u_r + \delta(t)m\dot{d} - m \hat{d}_A + (1/\gamma) \hat{d} \dot{\hat{d}} \\ = -\frac{1}{2} e^T Q e + (1 - \delta(t))m(\dot{d} - m(t) u_r) + \hat{d} \left[\delta(t)m\dot{d} + \frac{1}{\gamma} \hat{d} \right] \quad (19)$$

위의 (19)에서 다음 식과 같이 정의하면

$$\dot{\hat{d}}(t) = -\gamma \delta(t) m(t) \quad (20)$$

(19)의 가장 우측의 항은 없어진다.

(20)에서 $\dot{d}(t)$ 의 변환 속도가 느리다고 가정하면, 다음 식과 같은 적응 변환 식(adaptive updating law)을 구할 수 있다.

$$\frac{d(\delta(t)^{-1} \hat{d}_A(t))}{dt} = \gamma \delta(t) m(t)$$

위의 식을 적분하면 적응 제어기를 구할 수 있으나 본 논문에서는 동적 적응 이득 값의 변환 속도가 적응 제어기의 변환 속도에 비하여 느리다고 가정하고 (21)과 같이 근사화 하였다.

$$\dot{\hat{d}}_A(t) = \gamma \delta(t)^2 m(t) \cong \gamma \delta(t)^2 \overline{m}(t) \hat{g} \quad (21)$$

실제로 다음 장의 모사실험 결과에서 볼 수 있듯이 (21)에 의해 근사화된 적응 제어기를 구현하여도 제어성능이 별 차이 없이 우수함을 알 수 있다. (20)에 의해서 V의 시간 변화율 (19)은 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} e^T Q e + (1 - \delta(t))m(\dot{d} - m(t) u_r) \\ = -\frac{1}{2} e^T Q e + (1 - \delta(t)) \overline{m}(t) g \dot{d} \\ - \overline{m}(t) g \left(\frac{\overline{m}(t)}{m_{\lim}} \text{sgn}(g) d_{\max} \right) \quad (22) \\ \leq -\frac{1}{2} e^T Q e + (1 - \delta(t)) |\overline{m}(t)| |g| |\dot{d}| \\ - \frac{|\overline{m}(t)|^2}{m_{\lim}} |g| d_{\max}$$

(22)에서 $\delta(t)$ 는 앞에서 0보다 크고 1보다 작다고 가정하였으므로, 항상 양수임으로 절대 값 기호를 사용하지 않았다. (22)에서 만약 $1 - \delta(t)$ 를 다음과 같이 정의하면,

$$1 - \delta(t) = \frac{|\overline{m}(t)|}{m_{\lim}} \quad (23)$$

(22)은 다음과 같이 되어

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} e^T Q e + \frac{|\overline{m}(t)|^2}{m_{\lim}} |g| [|\dot{d}(t)| - d_{\max}]$$

(15)을 만족하게 된다. 따라서 경계 값 안에서도 안정성을 보장한다.

동적 적응 이득 값인 $\delta(t)$ 는 (23)으로부터 다음과 같이 정의된다.

$$\delta(t) = 1 - \frac{|\overline{m}(t)|}{m_{\lim}} \quad (24)$$

(24)을 보면 $\delta(t)$ 의 값은 경계 값 안에서는 항상 $0 < \delta(t) \leq 1$ 임

위 안에 있게 되고, 적응 제어기 설계시 초기에 설정한 가정을 만족하고 있다.

Remark 2 : (R1) 적응 제어기는 (21)식에서 보듯이 기존의 적응 제어기와는 달리 두 개의 적응 이득 값으로 이루어져 있고 이득 값 중 하나는 일반적인 형태인 정적 적응 이득 값이고 다른 하나는 제어 입력 시간에 따라 갱신되는 동적 적응 이득 값이다.

(R2) 오차 측정치인 $\overline{m}(t)$ 가 설정된 경계 값인 \overline{m}_{\min} 안으로 들어왔을 때, 동적 적응 이득 값인 $\delta(t)$ 는 0이 아닌 값을 가지며 $\overline{m}(t)$ 가 경계 값 안으로 들어감에 따라 큰 값을 가진다. 따라서 $\overline{m}(t)$ 가 경계 값에서 멀어짐에 따라 적응 제어의 역할은 점점 커지게 된다.

(R3) (19)식에서 보듯이 불확실성에 의한 항이 두 개로 분할되며 분할되는 정도는 $\delta(t)$ 에 의존하고 있다. 또한 분할된 항은 각각 강인 및 적응 제어기에 나뉘어 할당되고 있다. 다시 말하면, 적응 제어기는 경계 값 안에서 강인 제어기의 역할을 일부 나누어서 담당하고 있다. 오차 측정치가 경계 값 내부에서 경계 값 근방에 있을 때에는 동적 적응 이득 값이 작기 때문에 강인 제어기가 시스템의 구조적 불확실성에 의한 영향을 대부분 담당한다. 그러나 오차 측정치가 경계 값 안으로 점점 들어감에 따라 적응 제어기의 역할이 이에 따라서 점점 커지게 되며 오차 측정치가 0 근방에서는 적응 제어기가 불확실성에 대한 영향을 거의 전부 담당하게 된다.

(R4) 경계 값 안에서 적응 제어기의 도입은 불확실성의 거동이 비교적 느린 경우, 경계 값을 실험적 혹은 이론적으로 정교하게 설정해 주어야 하는 부담을 덜어줄 수 있다. 제 4장의 모사실험에서 볼 수 있듯이 적응 제어기로 인해 경계 값이 비교적 큰 값으로 주어져도 제어성능은 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다.

IV. 모사 실험

III장에서 제시한 적응성을 가진 강인한 비선형 예측 제어기의 성능을 시험하기 위한 모사실험의 대상은 박기용[2]의 논문에서 적용된 수중 주행 로봇의 1자유도 이동 모델을 사용하였다. 전/후진 운동에 대한 수중 주행 로봇의 동역학 방정식은 다음과 같이 2차 비선형 함수로 정의된다.

$$\dot{x} = f(x) + gu, \quad y = x \tag{25}$$

여기서 $x = [x \ \dot{x}]^T$, $f(x) = -(C_D/M)\dot{x}\dot{x}$ 이고, $g = CT/M$ 이다. 이들 매개변수들의 정의는 박기용[2]의 논문에서 기술되어 있으며 이에 대한 모델 값은 $M=77.5\text{Kg}$, $\hat{C}_D=14\text{Ns}^2/\text{m}^2$ 이고, \hat{C}_T 는 정방향에서는 0.00167N/s^2 , 역방향에서는 0.00293N/s^2 이다. (25)에 있는 함수의 변동 제한치는 아래와 같다.

$$\beta = \beta_M \cdot \beta_C = \sqrt{\frac{M_{\max}}{M_{\min}}} \cdot \sqrt{\frac{C_{T,\max}}{C_{T,\min}}}$$

$$F = \frac{1}{M} |\beta_M C_{D,\max} - \hat{C}_D| \dot{x}^2$$

여기서, $M_{\max}=120$, $M_{\min}=50$ 이고, $C_{D,\max}=40$ 이다. 본 논문에서도 실제 존재하는 C_T 의 불확실성은 제어기 설계에서는 반영

하지 않았다(즉, $\beta_C=1$ 로 간주함).

수중 로봇 주행을 위한 설정 경로는 다음과 같이 주기 함수 형태로 설정하였다.

$$y_d(t) = A \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \right]$$

여기서, A 는 1.5m, T 는 20sec로 설정하였다. 시스템 함수의 불확실성을 가하기 위해서 시스템 모델 변수들을 다음과 같이 변동하도록 하였다.

$$M(t) = 85 + 35 \cos((2\pi/10)t)$$

$$C_D(t) = 25 + 15 \sin(\dot{x}\dot{x})$$

$$C_T(t) = 0.00167 + 0.0005 \cos(t) \text{ (정방향 추진)}$$

$$C_T(t) = 0.00293 + 0.0005 \cos(t) \text{ (역방향 추진)}$$

또한 제어 입력은 다음과 같이 $|u| \leq 44100\text{rad}^2/\text{s}^2$ 로 제한되어 있다[2].

상기 수중 주행 로봇의 움직임 제어에 대하여 강인한 비선형 예측 제어기와 Sliding Mode 제어기(SMC) 및 PI 제어기의 제어 성능 비교는 박기용[2]의 논문에서 나타나 있다. 본 논문에서는 위에서 기술한 모사실험 환경에 강인한 비선형 예측 제어기(RNPC)와 적응성을 가진 강인한 비선형 예측 제어기(ARNPC)를 적용하여 제어 성능을 비교하여 ARNPC의 우수성을 나타내고자 한다.

그림 1은 RNPC를 적용하였을 때 위치 거동을 나타내고 있다. RNPC를 적용할 때의 경계 값 \overline{m}_{\min} 은 0.01로 설정하였고, Lyapunov 함수에 사용된 행렬 Q는 단위 행렬로 정하였다.

RNPC와 ARNPC에 의한 오차 측정 함수 $\overline{m}(t)$ 의 거동이 그림 2에, 두 제어기의 제어 입력이 그림 3에, 두 제어기의 성능 비교를 위하여, 나타나 있다. 그림 3에서 제어 입력의 값은 최대 값으로 정규화(w/441000)되어 있다. ARNPC 적용시 정적 적응 이득 값 γ 는 600000으로 설정하였다.

그림 2를 참조로 하여 RNPC와 ARNPC의 제어 성능을 비교하여 보면 ARNPC가 RNPC에 비해 훨씬 우수한 제어 성능을 보임을 알 수가 있다. 수중 주행 로봇 움직임 제어에 ARNPC를 적용하였을 때, 동적 적응 이득 값 $\delta(t)$ 의 거동이 그림 4에 나타나 있다. 그림 5는 적응 제어기가 그의 상용하

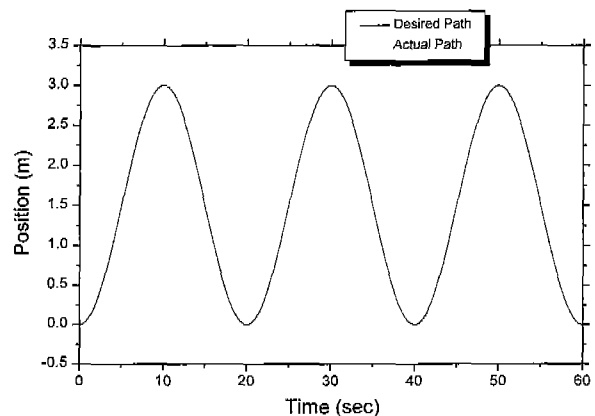


그림 1. RNPC의 제어 결과.

Fig. 1. Tracking performance of RNPC for an UWR with modeling uncertainty.

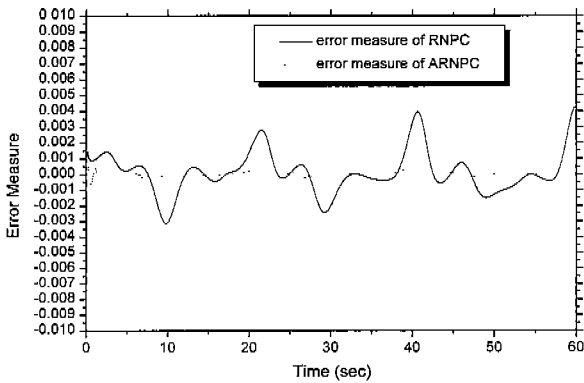


그림 2. 경계값(\bar{m}_{lm})이 0.01인 경우 RNPC와 ARNPC의 오차 측정 함수 $\bar{m}(t)$ 의 변화.
 Fig. 2. Behavior of error measure functions of RNPC and ARNPC for $\bar{m}_{lm} = 0.01$.

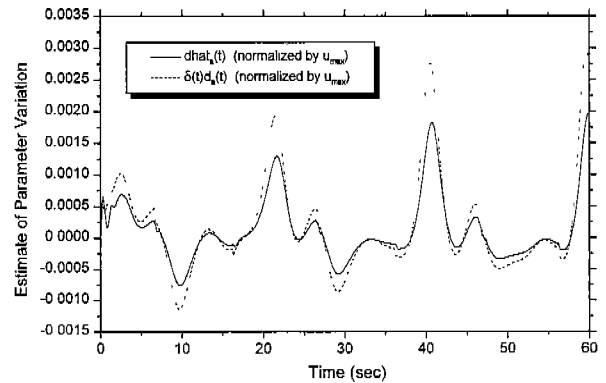


그림 5. 적응 제어기의 추종 결과.
 Fig. 5. Estimation of corresponding uncertainty by adaptive controller.

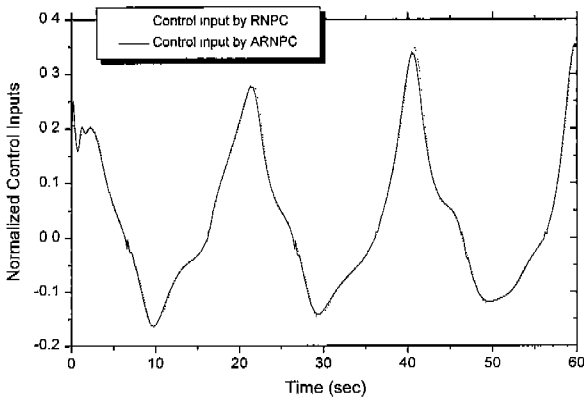


그림 3. RNPC와 ARNPC의 제어 입력.
 Fig. 3. Control inputs of RNPC and ARNPC.

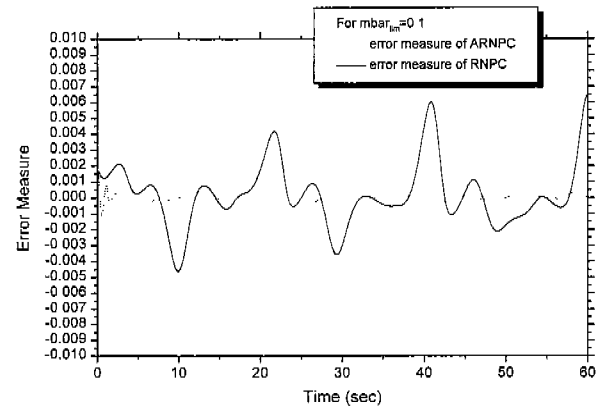


그림 6. 경계 값(\bar{m}_{lm})이 0.1인 경우 RNPC와 ARNPC의 오차 측정 함수 $\bar{m}(t)$ 의 변화.
 Fig. 6. Behavior of error measure functions of RNPC and ARNPC for $\bar{m}_{lm} = 0.1$.

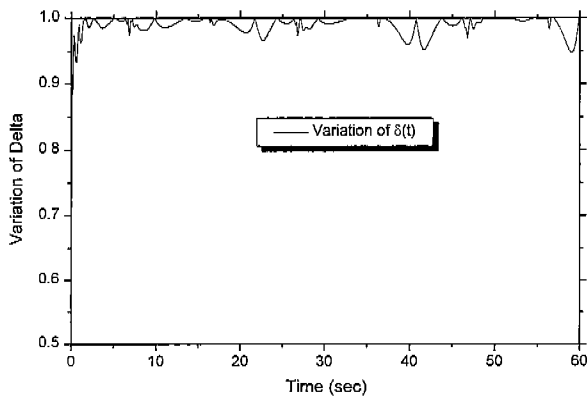


그림 4. ARNPC의 $\delta(t)$ 의 거동.
 Fig. 4. Behavior of $\delta(t)$ of ARNPC.

는 불확실한 값을 추종한 결과를 보여주고 있다. 그림 5에서 보듯이 적응 제어기는 적응 제어기에 할당된 불확실한 값을 완벽하게는 추종하지 못하지만, 비교적 상당히 좋은 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 경계 값을 0.1로 크게 설정한 경우를 보여 주고 있다. 그림 6에서 보듯이 경계 값을 크게 설정하면 RNPC는 경계 값 안에서 제어 성능이 저하되나 ARNPC의 제어 성능

은 경계 값이 0.01인 경우와 별 차이가 없었다. 본 논문에서는 나타나 있지 않지만 여러 경계 값에 대하여 실험을 해 본 결과 적응 제어기가 있는 경우 경계 값 안에서의 제어 성능은 별 차이가 없었다. 이 결과로부터 보통 강인 제어기는 제어 성능을 높이기 위하여 경계 값을 이론적 혹은 실험적으로 정교하게 설정해야 하지만, ARNPC를 적용할 경우는 적당한 값을 주어도 별 문제가 없음을 알 수가 있었다.

V. 결론

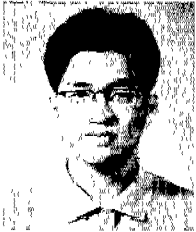
본 논문에서는 모델 변수가 불확실성을 가지고 있는 비선형 시스템에서 안정성을 보장하고 오차 수렴성을 가지는 적응성을 갖는 강인한 비선형 예측 제어기를 제시하였다. 이 제어기의 기본 제어 법칙은 비선형 예측 모델을 기반으로 하여 구축되나 페루프 동역학 특성은 제한 선형화 특성을 보이고 있어 모델이 정확한 경우 오차 수렴성을 보장한다. 모델이 정확하지 않은 경우 본 제어기의 강인 제어기가 오차 측정치에 대한 설정된 경계 값까지는 안정성을 보장한다. 경계 값 안에서의 오차 수렴성을 위하여 적응 제어기를 설계하였다. 적응 제어기는 경계 값 안에서 강인 제어기의 부족한 역할을 보상하게 되는데 이 제어기의 성능을 수증

주행 로봇에 대한 모사 실험을 통하여 우수함을 파악할 수 있었다.

참고문헌

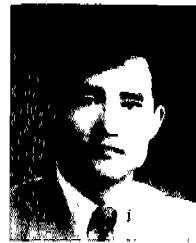
- [1] P. Lu, "Optimal predictive control of continuous nonlinear systems," *Int. J. of Control*, vol. 62, no. 3, pp. 633-649, 1995.
- [2] 박기용, 윤지섭, 박영수, "Robust nonlinear predictive control of underwater wall-climbing robot," 제어·자동화·시스템공학회지, 제4권, 제6호, pp. 772-779, 1998.

- [3] D. W. Clarke, C. Mohtad, and P. S. Tuffs, "Generalized predictive control - part I. basic algorithm," *Automatica*, vol. 23, no. 2, pp. 137-148, 1987.
- [4] B. E. Ydstie, "Extended horizon adaptive control," *Proc. 9th IFAC World Congress*, Budapest, Hungary, 1984.
- [5] A. R. Cauwenbergh, et al., "Self adaptive long range predictive control," *Proc. America Control Conference*, TP10, pp. 1155-1160, 1985.
- [6] R. Soeterboek, *Predictive Control : A Unified Approach*, Prentice-Hall, New York, 1992.



박 기 용

1990년 한양대학교 원자력공학과 졸업. 한국과학기술원 원자력공학과 석사(1992). 동대학원 박사(1986). 1996년~현재 한국원자력연구소 한국원자력연구소 핵연료주기단 원격취급장치개발실 선임연구원. 관심분야는 지능 및 비선형 강인제어, 공정 자동화 및 계측제어, 고장 진단.



윤 지 섭

1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 한국과학기술원 기계공학과 석사(1982). 동대학원 박사(1987). 1987년~현재 한국원자력연구소 핵연료주기단 원격취급장치개발실 책임연구원/실장. 관심분야는 원자력 시설 검사/보수/해체 기술, 로봇 및 센서 기술, 생산자동화 및 계측제어.